

국내 자원 탐사 및 개발의 효율성 증대를 위한 통합 층서적 접근

Integrated stratigraphic approach for enhancing the efficiency of domestic resources exploration and development

유 인 창 (In-Chang Ryu)*

요 약

에너지 및 광물자원의 탐사는 국가경영에 있어서 절대적으로 필요한 공공의 기반산업에 해당된다. 그 동안 수행되어 왔던 자원 탐사사업의 대부분은 비교적 지하 천부에 분포하는 단순 구조 트랩들의 탐사에 집중되어 왔다. 아울러 천부 구조 트랩들의 과도한 개발로 인하여 자원 탐사의 범위도 점차 지하 심부에 분포하는 미세 층서 트랩들로까지 확대되고 있다. 지하 심부에 분포하는 트랩들에 대한 탐사의 확대는 분지 내 심부 퇴적층들에 대한 정밀한 대비와 평가를 요구한다. 그러나, 그 동안 천부 구조 트랩들의 평가에 적용되어 왔던 기재적 층서 원리들로는 심부에 분포하는 트랩들을 도출해 내는데 한계가 있어 왔다. 따라서, 분지 내 퇴적층들에 대한 보다 명확한 이해를 위한 새로운 층서들의 수립이 시급하다. 본 연구에서는 오오도비스 중기 태백산 분지와 백악기 남황해 분지의 층서에 대한 통합 층서적 접근을 통한 전형의 예를 제공하고자 하였다. 이러한 통합 층서적 접근은 동 퇴적 분지들의 구조적 진화에 따른 층서를 규명하는데 있어서 보다 나은 통찰을 제공하고 있으며, 아울러 동 퇴적 분지들의 자원 탐사 및 개발의 효율성을 증대시키는데 사용될 수 있을 것으로 전망된다. 따라서, 통합 층서적 접근은 모든 형태의 자원 탐사 및 개발사업에 있어서 성공률을 높이기 위한 새로운 층서적 규범으로 고려되어야 한다.

주요어 : 자원탐사, 통합층서, 분지발달사, 태백산 분지, 남황해 분지

Abstract : Prospecting for energy and mineral resources is essential kind of public fundamentals that manage the nation's economy. Most explorations in the past were concentrated in the simple structural traps in relatively shallow depth. Due to their vast exploitation, recent history has shown that the emphasis in explorations has steadily shifted toward the subtle stratigraphic traps in deeper level. Increasing exploration for the subtle stratigraphic traps in deeper level requires precise correlation and assessment of deeply buried strata in the basin. However, the descriptive stratigraphic principles used for evaluation of the simple structural traps are limited to delineate the subtle stratigraphic traps in deeper depth. As this occurs, it is imperative to establish a new stratigraphic paradigm that allows a more sophisticated understanding on the basin stratigraphy. This study provides an exemplary application of integrated stratigraphic approach to defining basin stratigraphy of the Middle Ordovician Taebaeksan Basin and the Cretaceous South Yellow Sea Basin, Korea. The integrated stratigraphic approach gives much better insight to unravel the stratigraphic response to tectonic evolution of the basins, which can be utilized for enhancing the efficiency of resources exploration and development in the basins. Thus, the integrated stratigraphic approach should be considered as a new stratigraphic norm that can improve the probability of success in any type of resources exploration and development project.

Key words : Exploration, Integrated stratigraphy, Basin history, Taebaeksan Basin, South Yellow Sea Basin

서 론

에너지 및 광물자원의 탐사사업은 국가경영에 있어서 절대적으로 필요한 공공의 기반산업에 해당된다. 그 동안 국내·외를 통해 수행되어 왔던 자원 탐사사업의 대부분은 비교적 천부에 분포하는 구조 트랩들의 탐사에 집중되어 왔으며, 이러한 구조 트랩들의 집중적인 개발로 인하여 자원 탐사의 범위도 점차 심부에 분포하는 구조 트랩 및 미세 층서 트랩들로까지 확대되고 있는 실정이다. 그러나, 그 동안 천부 구조 트랩들의 개발에 적용되어 왔던 기존의 개념들은 심부에 분포하는 구조 트랩 및 미세 층서 트랩들의 탐사에 한계가 있어왔으며, 이들을 효율적으로 개발

해 내기 위해서는 개량된 지질학적 원리나 평가 개념들을 바탕으로 지하 심부 퇴적층들에 대한 보다 정밀한 대비와 해석이 가능한 새로운 탐사 전략들이 수립되어야 할 것이다.

최근 국내 대륙붕 울릉 분지의 제3기 퇴적층 내에서 경제성 있는 규모의 탄화수소 가스층이 발견된 것이 그 좋은 예이며, 이러한 성과는 1995년 이후 한국석유공사의 국내 대륙붕 에너지자원 평가에 대한 개념이 기존의 유망 구조별 또는 광구별 평가에서 퇴적 분지별 평가로 탐사 전략의 일대 전환에 기인한 바가 크다. 그러나 퇴적 분지들에 대한 자원 부존 가능성에 대한 평가는 1개의 특정 분지만을 한정 조사하는 것으로 완결되는 것은 아니다. 즉, 이들 분지들은 지체 구조적으로 서로 밀접하게 연관되어 있

*고려대학교 지구환경과학과 (Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea); inchang@korea.ac.kr

기 때문에 인접 지역인 중국, 러시아, 일본 등을 포함하는 동아시아 지역 전체에 대한 광역 지체구조 운동을 근간으로 각 퇴적 분지들의 발달사를 상호 비교하고, 아울러 분지 내 퇴적층들의 성인에 대한 시·공간적 관계를 정밀 해석함으로써 각 분지별 에너지 및 광물자원의 부존 가능성이 보다 입체적으로 평가될 수 있다.

광역 지체 구조운동과 함께 퇴적 분지 발달사의 상호 비교와 분지 내 퇴적층들의 정밀 해석에 따른 분지별 자원 부존 가능성의 입체적 평가는 그 동안 국내·외 자원 탐사 사업에 주로 적용되어 왔던 기재적 층서 원리들로는 불가능하며, 1990년 이후 석유자원 탐사사업에 적용되기 시작하면서 탐사 성공률을 높이는 데 있어 괄목할 만한 성과를 거두고 있는 순차 층서학 (sequence stratigraphy)이나, 또는 이들을 바탕으로 최근에 새롭게 대두되기 시작한 통합 층서 기술 (integrated stratigraphy technology)의 도입이 선행되어야 만이 가능하다. 본 연구에서는 이와 같이 자원 탐사에 있어서 새로운 층서 해석 기법으로 부상하고 있는 통합 층서 기술을 국내의 태백산 분지 오오도비스 중기 퇴적층 및 북부 남황해 분지 백악기 퇴적층에 실험적으로 적용해 봄으로써 국내 에너지 및 광물자원 탐사기술을 더 한층 발전시킬 수 있는 발판을 마련함과 동시에 향후 정부 주도하에 수행될 국내·외 자원 탐사 및 개발사업의 성공률 증대를 위해 필수적으로 고려되어야 할 새로운 층서적 규범에 대한 예를 제시하고자 한다.

통합 층서 기술 (Integrated Stratigraphy Technology)

통합 층서 기술은 에너지 및 광물자원 탐사에 있어서 핵심인 퇴적 지질학의 원류에 해당하는 기술로 그 동안 저류암이나 근원암과 같은 퇴적층들의 동정과 지역간 대비를 위해 독립적으로 발전되어 왔고, 필요에 따라 선택적으로 적용되어 왔던 각각의 기재적 층서 원리 (예: 암층서, 생층서, 시층서)들을 하나의 통합된 개념으로 묶어 분지 내 퇴적층들을 보다 정량적으로 해석하려는 시도이며, 분지형성 구조운동, 퇴적작용 및 분지변형 구조운동 등 퇴적층들의 성인에 대한 시·공간상의 대비가 가능한 고해상도의 층서들을 제시하기 위한 기술이다.

이러한 통합 층서 기술은 미국 엑슨사의 층서 연구팀에 의해 지하 심부에 분포하는 퇴적층 대비의 정밀성과 석유자원 탐사 및 개발사업의 성공률을 높이기 위해 제안된 탄성과 층서학이 순차 층서학의 개념으로 발전하면서 시작되었으며, 1990년 순차 층서학의 개념이 본격적으로 석유자원 탐사사업에 적용된 이후 탐사 성공률 제고에 괄목할 만한 성과를 거두고 있다 (Weimer and Posamentier, 1993). 그러나 순차 층서학의 개념들은 대체적으로 범 세계적 해수면의 변화가 퇴적 작용을 지배한다는 가정 하에 출발하였기 때문에 해수면 변화에 영향을 덜 받는 심해저 기원의 퇴적층이나 육성 기원의 퇴적층 및 구조운동의 영향을 많이 받는 구조 활성 지역, 또는 화성 활동과 연계된 퇴적 분지들에 대한 적용에 한계가 있어 왔으며, 이러한 적용성의 한계 및 단점들을 극복해 내기 위해 보다 발전된 층서 개념으로의 통합 층서 기술에 대한 연구가 현재 미국 주요 석유회사 층서 연구실을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 특히, Mobil사의 층서 연구팀은 통합

층서 연구의 일환으로 퇴적층 내에서 산출되는 화석들을 정량적으로 분석하거나, 또는 점토 광물 및 유기 물질의 수직 분포를 지구 화학적 방법을 통해 정량적으로 분석, 심해저 기원의 퇴적층이나 구조 활성 지역의 퇴적층들에 대한 통합 층서 기술의 적용 범위를 넓히고 있다 (Armentrout, 1996). 이러한 기술 개발의 가시적 효과로 과거의 탐사 개념으로는 석유 부존 가능성이 없거나 희박하다고 판단되었던 지역이나 지하 심부의 퇴적층 내에서 경제성 있는 규모의 다중 석유 트랩들을 확보하기 시작하였다.

이와 같이 통합 층서 기술은 퇴적층들을 단순히 퇴적 작용이라는 물리적 현상의 산물로 이해하기 보다는 하나의 통합된 체계 속에서 물리·화학·생물학적 현상들의 상호관계에 의해 복합적으로 일어나는 역동적 현상의 산물로 이해하려는 하나의 새로운 층서적 사고의 틀로 퇴적 지질학, 지구 화학, 고생물학, 지구 물리학 등 다양한 지구과학 분야를 근간으로 에너지 및 광물자원 탐사의 성공률을 높이기 위해 새롭게 부상하고 있는 기술이다.

태백산 분지 오오도비스 중기 퇴적층의 예

층서 개요 및 문제점

강원도 일대의 태백산 분지에 분포하는 고생대 퇴적층은 그 동안 지역에 따른 암상 및 화석군의 차이에 따라 두위봉형, 정선형, 평창형 및 영월형으로 구분되어 왔다 (그림 1). 태백산 분지 백운

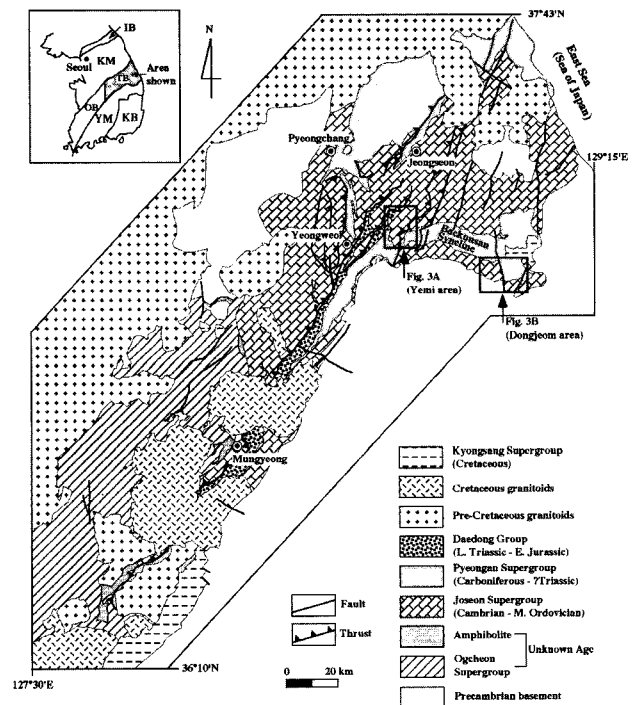


Fig. 1. Geologic map of the Taebaeksan Basin. The study areas include northwestern (Yemi area) and southeastern (Dongjeom area) limbs of the Backunsan Syncline. Abbreviations in the index map: IB = Imjingang Belt; KM = Kyonggi Massif; TB = Taebaeksan Basin; OB = Ogcheon Basin; YM = Yongnam Massif; KB = Kyongsang Basin.

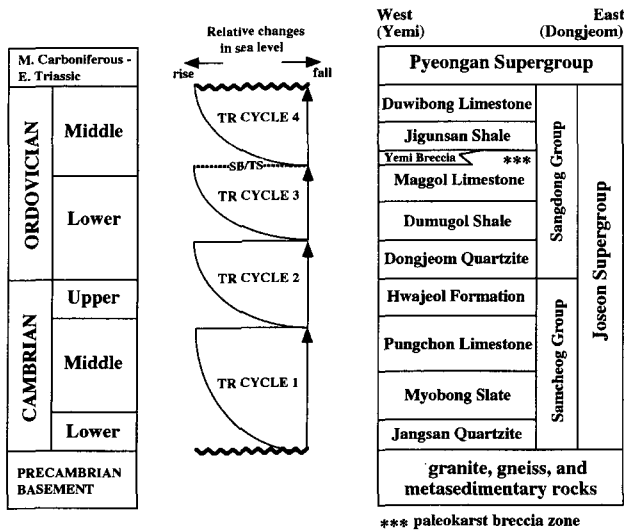


Fig. 2. Lithostratigraphic nomenclature of the Cambro-Ordovician Joseon Supergroup, Backunsan Syncline (Cheong, 1969).

산 향사대를 따라 분포하는 고생대 퇴적층은 두위봉형으로 선캠브리아기의 기반암을 부정합으로 덮는 캄브로-오오도비스기의 조선누층군과 이를 다시 부정합으로 덮는 석탄기 및 페름기 (또는 트라이아스기 초?)의 평안누층군으로 대별된다 (그림 1, 2). 총 두께 1,500 m 이상인 두위봉형 캄브로-오오도비스기 조선누층군을 암층서적으로 분류하면 캄브리아기의 삼척층군과 오오도비스기의 상동층군으로 구분되며, 캄브리아기 삼척층군은 하부로부터 장산규암층, 묘봉슬레이트층, 풍춘석회암층 (또는 대기층) 및 화절층 (세송슬레이트층과 화절층으로 구분하기도 함)으로, 오오도비스기 상동층군은 동점규암층, 두무골세일층, 막골석회암층, 직운산세일층 및 두위봉석회암층으로 세분된다 (그림 2).

암층서적 분류에 따른 두위봉형 조선누층군은 각 암층서 단위층들의 접촉관계가 상당히 점이적이기 때문에 캄브로-오오도비스기 동안 연속적으로 퇴적된 하나의 정합적인 퇴적체로 해석되어져 왔다 (Cheong, 1969). 또한 이들의 암상이 수직 층서상 규암, 셰일, 석회암 또는 셰일, 석회암 등과 같이 규칙적으로 반복되는 양상을 보이고 있으며 (그림 2), 구조운동 등에 기인한 급격한 횡적 상변화가 인지되지 않기 때문에 두위봉형 조선누층군은 대륙지가 내 천천히 침강하는 탄산염 대지 위에 해수면의 반복적인 상승과 하강에 따른 연속적인 퇴적사를 기록하는 것으로 해석되어져 왔다 (Cheong, 1969).

이와 같이 암층서 단위층들이 수직 층서상 주기적으로 반복되어져 나타나는 특징은 그 동안 태백산 분지 캄브로-오오도비스기 퇴적층들의 동정 및 인접 지역과의 대비를 위한 기준이 되어 왔으며 (정창희 외, 1973), 이를 기준으로 지역에 따른 암상 및 화석군의 차이를 기재적 의미로 두위봉형, 정선형, 평창형 및 영월형 등으로 구분하여 왔다 (그림 1). 그러나, 수직 층서상 반복되어 나타나는 암상의 주기성을 기준으로 하는 퇴적층의 동정 및 대비는 공간상에서 일어날 수 있는 퇴적 작용의 다양성을 간과하고 있기 때문에, 분지 전반에 걸쳐 일어나는 퇴적 양상 및 층서 관계 등,

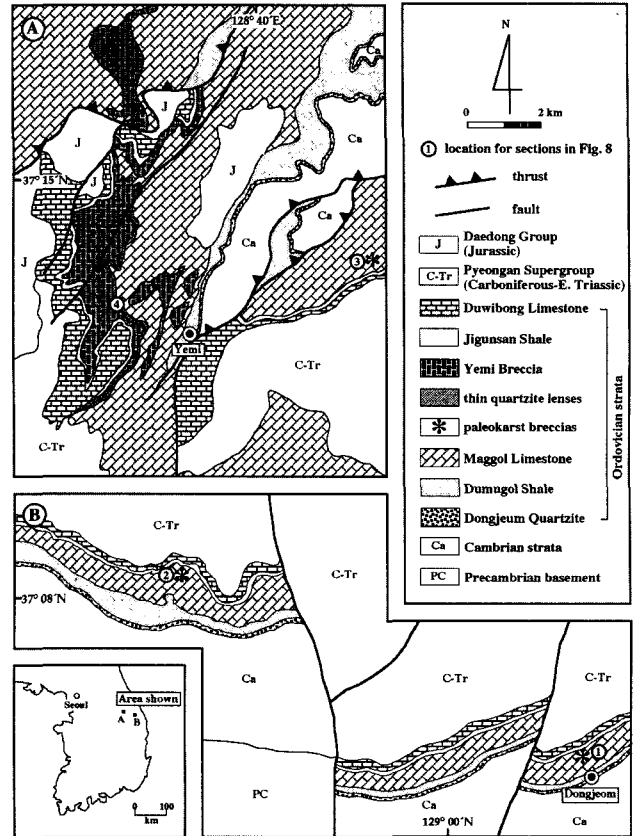


Fig. 3. Detailed geologic maps of the study areas. A) Yemi area and B) Dongjeom area. Asterisk indicates the occurrence of paleokarst-related solution-collapse breccias in the upper Maggol Limestone. Note the occurrence of siliciclastic quartzite lenses and the Yemi Breccia near west of Yemi, which are interpreted as a coeval off-platform lowstand systems tract.

실체적 분지 발달사를 연구하는데 있어 하나의 문제점으로 지적되어 왔다 (Wilgus *et al.*, 1988; Van Wagoner *et al.*, 1990). 최근에 제기된 태백산 분지 고생대 퇴적층들의 층서 및 퇴적작용에 관한 재고찰의 필요성은 바로 이러한 문제점을 반영한 것으로 볼 수 있으며, 기존의 태백산 분지 고생대 퇴적층들에 대한 지질학 전반의 연구결과에 심각한 해석적 오류가 있을 수 있음을 시사한다 (유인창 외, 1997a; 1997b). 아울러, 잘못된 해석을 바탕으로 수행되었을 수 있는 태백산 분지 내 광물 자원의 탐사 및 개발 사업의 기존 전략들도 또한 재고 되어져야 함을 의미한다.

두위봉형 오오도비스 중기 퇴적층의 암층서 및 퇴적환경

본 연구의 대상인 태백산 분지 오오도비스 중기의 퇴적층은 막골석회암 상부와 직운산세일 및 두위봉석회암층으로 구성된다 (그림 2). 이들 오오도비스 중기 퇴적층은 대체로 동서 방향의 주향을 따라 30-50° 북경사하여 연구 지역 내에 대상으로 분포한다 (그림 3). 200 m 이상의 두께를 가지는 막골석회암층은 주로 판상 및 렌즈상, 또는 괴상의 돌로마이트질 석회암과 돌로마이트로 구성되며, 일부 탄산염 각력암이나 평력암들이 협재한다. 일반

적으로 막골석회암의 하부층군은 돌로마이트질 석회암이, 상부층군은 돌로마이트가 우세하게 나타나며, 이러한 돌로마이트질 석회암과 돌로마이트들은 속성작용 초기에 일어난 돌로마이트화 작용에 의한 것으로 해석된다 (Paik, 1986). 막골석회암을 정합으로 덮는 30-40 m 두께의 직운산세일층은 주로 괴상의 흑색 세일로 구성되어 있으며 상부로 갈수록 단괴상 세일로 전이한다 (그림 4). 직운산세일층을 정합으로 덮는 두위봉석회암층은 두위봉형 조선누층군의 최상부층으로 60-100 m 정도의 두께를 보이며, 석탄기-페름기 평안누층군에 의해 부정합으로 덮인다 (그림 2). 두위봉석회암층은 주로 담회색의 괴상 또는 생쇄설성 석회암으로 이루어져 있으며 평력암 및 단괴상 또는 석회질 세일들이 협재한다.

Paik (1987)은 막골석회암층 내에 발달하는 퇴적 구조와 암상을 바탕으로 막골석회암층의 퇴적 환경을 탄산염 대지로 해석하였으며, 막골석회암층 하부층군에는 조하대 환경이 우세하게 나타나나, 상부로 갈수록 조상대의 환경으로 전이되는 해퇴상의 수직 층서를 보인다고 하였다. 막골석회암층을 정합으로 덮는 직운산세일층은 주로 괴상의 흑색 세일로 구성되어 있기 때문에 아직까지 퇴적상에 대한 연구가 진행된 바는 없으나, 암상만을 기준으로 깊은 조하대에서 퇴적된 것으로 이해되어져 왔다. 한편 Lee (1988) 및 Hyeong (1990)은 직운산세일층을 정합으로 덮는 두위봉석회암층에서 8개의 퇴적상을 인지하고 수직 층서상 두위봉석회암층이 비교적 깊은 조하대로부터 폭풍 퇴적물이 우세한 얕은 조하대를 거쳐 조간대에 이르는 환경 하에서 퇴적되었던 것으로 해석하였다. 따라서 태백산분지의 오오도비스 중기 동안의 퇴적 작용은 막골석회암층이 조하대 퇴적상으로부터 조간대를 거쳐, 조상대의

퇴적상으로 전이되고, 직상부의 깊은 조하대의 직운산세일층에 의해 정합으로 덮이며 이를 다시 얕은 조하대를 거쳐 조간대 퇴적상으로 전이되는 두위봉석회암층이 정합으로 덮고 있기 때문에, 수직 층서상 해퇴에 이은 해침과 또 한번의 해퇴를 기록하는 연속적인 퇴적 순회로 해석되어져 왔다 (Paik, 1985, 1987; Woo and Park, 1989).

그러나 최근 Ryu (2002)는 동점 지역에 분포하는 막골석회암층의 정밀 기체를 통해 5가지 형태의 5차 단위 상향침식화 순차층 (fifth-order shallowing-upward cycle)들을 구분해 내고, 이들을 다시 4차 및 3차단위의 순차층으로 묶어 중부 및 상부 막골석회암층을 5개의 단위층으로 세분화하였다 (그림 4). 세분된 5개의 단위층들을 해침상 또는 해퇴상으로 구분하여 단위층 I (해침상)과 단위층 II (해퇴상)를 하나로, 단위층 III (해침상)과 단위층 IV (해퇴상)를 하나로 묶어 각기 해침에 이은 해퇴를 기록하는 2차 단위 순차층들을 정의하였다 (그림 4). 아울러, 막골석회암층 최상부의 단위층 V (해침상)와 이를 정합으로 덮는 직운산세일층 및 두위봉석회암층 (해퇴상)을 하나의 해침과 해퇴를 보이는 2차 단위 순차층으로 해석하여 오오도비스 초기 말과 중기 사이에 3번의 연속적인 해침과 해퇴가 반복되었음을 규명하였다.

생층서 및 시층서

막골석회암층의 지질시대는 대체로 오오도비스 초기의 아래니지안 (Arenigian)과 오오도비스 중기의 란비니안 (Llanvirnian) 초에 해당됨이 그 동안의 고생물학적 연구를 통해 밝혀졌다 (Kobayashi, 1966; 이하영과 이종덕, 1971; Lee, 1976; Lee and

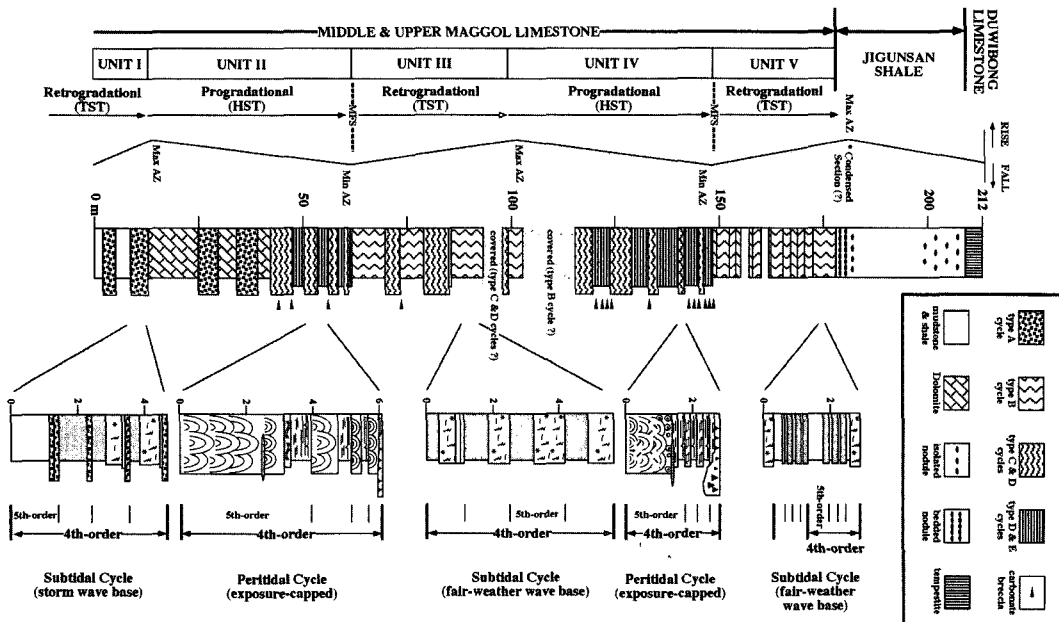


Fig. 4. Simplified columnar section of the middle and upper Maggol Limestone and the overlying Jigunsan Shale at Dongjeom area. On the basis of the systematic changes in stacking pattern of meter-scale fourth-order cycles, the middle and upper Maggol Limestone can be subdivided into five distinct units (I to V). Two transgressive-regressive cycles are recognized in the units I to IV. The overlying unit V is a stack of subtidal fourth-order cycles. Each boundary of T-R cycles represents a major marine-flooding surface. Note the 4:1 bundling of fifth-order cycles within fourth-order cycles. Abbreviations: MFS = major marine-flooding surface; Min AZ = Minimum Accommodation Zone; Max AZ = Maximum Accommodation Zone; TST = transgressive systems tract; HST = highstand systems tract.

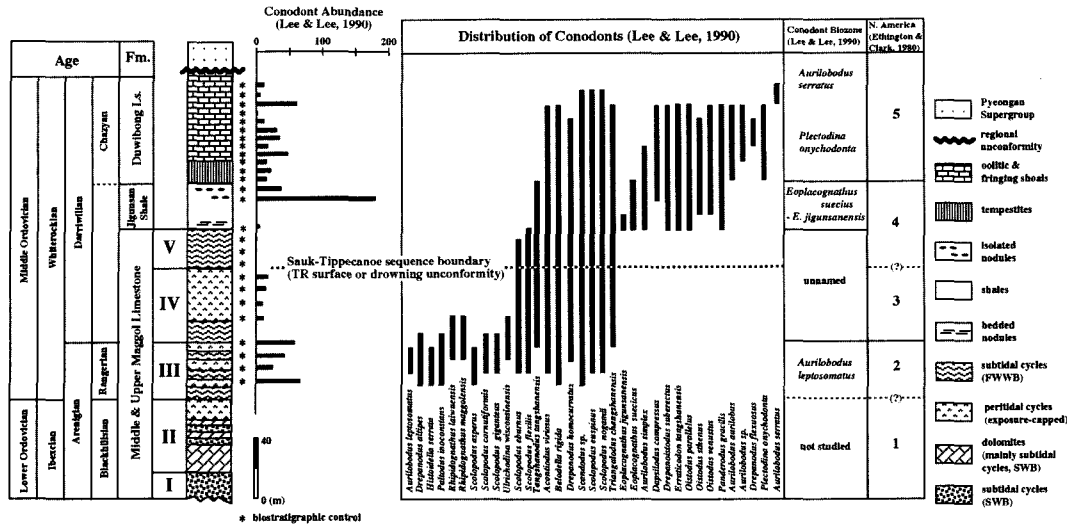


Fig. 5. Composite stratigraphic column and conodont biostratigraphy of the upper Maggol Limestone, the Jugunsan Shale, and the Duwibong Limestone. Conodont biostratigraphy indicates that the Lower to Middle Ordovician chronostratigraphic boundary lies between the unit II and the unit III. Also, the boundary between the unit IV and the unit V may be coincident with the Sauk-Tippencanoe sequence boundary of Sloss (1963). Conodont data from Lee and Lee (1990).

Lee, 1990). Kobayashi (1966)는 막골석회암층 기저부에서 삼엽층 및 28종의 대형화석을 기재하고, 막골석회암층을 오오도비스 초기 아래니지안에 해당되는 캐나다안 (Canadian) 중부와 상부에 대비시켰다. 한편 이하영과 이종덕 (1971) 및 Lee (1976)는 본층에서 39종의 코노돈트 화석을 기재하고 이 화석군에 의해 막골석회암층을 아래니지안과 란비니안 초기에 해당되는 캐나다안 상부와 채즈안 (Chazyan) 중부에 대비시켰다. 특히, Lee and Lee (1990)는 막골석회암층과 직운산세일 및 두위봉석회암층에 대한 집중적인 코노돈트 화석 연구를 통해 3개층을 5개의 코노돈트 생층서대로 분대 하였으며 (그림 5), 이들을 북미 대륙 중부의 코노돈트 생층서대와 대비시켜 막골석회암층의 상한이 오오도비스 중기의 란비니안까지 연장됨을 밝혀내고, 막골석회암층을 오오도비스 초기의 아래니지안과 오오도비스 중기의 란비니안 초에 대비시킴으로, 막골석회암 상부층준에서 오오도비스 초기와 중기 사이의 시층서 경계가 존재함을 시사하였다.

이와 같은 Lee and Lee (1990)의 코노돈트 생층서 자료를 최근에 개정된 코노돈트 생층서 분대와 함께 Ryu (2002)에 의해 세분된 막골석회암층의 암층서와 비교해 보면, 단위층 II와 III의 경계면이 오오도비스 초기 및 중기의 경계인 아이벡시안 (Ibexian)과 화이트록키안 (Whiterockian)의 시층서 경계에, 단위층 III과 IV의 경계면이 아래니지안과 달리윌리안 (Darriwilian)의 시층서 경계에 각기 해당되는 것으로 해석된다 (그림 5). 또한, 각 단위층들에 대한 코노돈트의 산출량을 비교해 보면, 단위층 IV에서 단위층 V로 전이되면서 코노돈트의 산출량이 급격히 감소하는 현상과 함께 직운산세일층 내에서 산출량이 또한 급격히 증가하는 현상이 인지된다 (그림 5). 이러한 현상들은 각기 해수면의 하강에 따른 연계층 경계와 해수면이 최고조에 달하였을 때 퇴적되는 응축층 (condensed section)의 형성과 연관된 것으로 해석된다 (Armentrout, 1996).

순차층서 및 통합층서

생층서 연구 결과의 새로운 해석과 함께 유인창 외 (1997b)는 태백산 분지 오오도비스 중기 퇴적층인 막골석회암 상부 층준 (단위층 IV) 내에 집중적으로 나타나는 탄산염 각력암들에 대한 새로운 해석을 시도하였다. 일반적으로 탄산염 암층 내에 발달할 수 있는 각력암들을 성인적으로 분류하면 단층과 연계되어 발달하는 단층 각력암, 열수의 관입에 의한 열수 각력암, 퇴적 당시의 요인에 의한 퇴적 각력암 및 고기 카르스트의 형성에 수반되어 발달하는 용식·붕락 각력암 등으로 분류될 수 있다. 이러한 탄산염 각력암들의 산출상태를 보면, 단층 각력암은 단층면에 규제되어 단층면을 따라 판상이나 쉘기상으로 발달하며, 열수 각력암은 층리와 무관하게 관입상으로 산재되어 발달하나, 퇴적 각력암이나 용식·붕락 각력암들은 층리에 규제되어 여러 층준에 걸쳐 층상으로 협재되어 발달하는 것으로 알려져 있다 (Fritz et al., 1993).

막골석회암층 내의 탄산염 각력암들은 일부 층리와 무관하게 산재되어 발달하거나, 또는 층리에 규제되어 여러 층준에 걸쳐 층상으로 발달하고 있기 때문에, 그 동안 단층 각력암이나, 열수 각력암, 또는 폭풍이나 암설류 등과 같은 퇴적 당시의 요인에 의한 퇴적 각력암등으로 비교적 단순하게 해석되어 왔다. 따라서, 막골석회암 상부 층준에 발달하는 탄산염 각력암들에 대한 층서적 중요성이 인식되지 못하여 왔으며 (김옥준과 권영식, 1970; Paik, 1985, 1987; Woo and Park, 1989), 막골석회암층의 퇴적상 및 암상이 직상부의 직운산세일층으로 갈수록 점이적으로 변화한다는 사실에 의거, 막골석회암층과 직운산세일층의 층서 관계가 단순한 해퇴와 해침에 의한 정합적인 것으로 해석하였다 (Paik, 1987; Woo and Park, 1989). 그러나 유인창 외 (1997b)는 막골석회암 상부 층준인 단위층 IV 내에 집중적으로 발달하는 탄산염 각력암들을 산출상태를 기준으로 고기 카르스트의 형성에 수반되어 발달하는 용식·붕락 각력암으로 분류하고 이들의 발달은 곧

막골석회암 상부 층준 내에 고기 카르스트의 형성에 관계된 대기 노출면 및 부정합이 존재한다고 해석하였다 (그림 4). 따라서 수직 층서상 단순한 해퇴에 이은 해침의 퇴적유희로 해석되었던 막골석회암층과 직운산세일층과의 정합적인 층서 관계는 오오도비스 초기와 중기 초까지 탄산염 대기 환경 하에서 퇴적된 막골 탄산염 암층들은 오오도비스 중기 달리윌리안 초에 들어와 해수면 하강에 의해 대기 중에 노출되었던 것으로 판단되며, 대기노출에 의한 고기 카르스트의 발달과 함께 용식·붕락 각력암들이 막골 탄산염 암층 (단위층 IV) 내에 기록되었고, 이후 해침상의 막골 석회암 (단위층 V)과 직운산세일층이 차례로 퇴적되었던 것으로 재해석하였다 (유인창 외, 1997b; 그림 4, 5).

단위층 IV 내에 발달하는 탄산염 각력암들에 대한 새로운 해석을 코노돈트 생층서 연구 결과와 비교해 보면 태백산 분지 오오도비스 중기 퇴적층에 대한 순차 및 통합 층서 해석에 있어서 매우 중요한 의미가 도출된다. 즉, 막골석회암층 내 단위층 III과 단위층 IV 사이에 아레니지안과 달리윌리안의 시층서 경계가 존재한다는 생층서 연구 결과는 그 상위 층준인 단위층 IV에 나타나는 용식·붕락 각력암들의 형성이 오오도비스 중기 초에 전세계적으로 기록된 2차 순위의 해수면 하강과 밀접한 관계가 있음을 시사한다 (그림 6). 따라서, 단위층 IV과 단위층 V 사이의 경계가 Sloss (1963)의 Sauk-Tippecanoe 연계층 경계인 전세계적 규모의 부정합과 잘 대비되기 때문에 순차 층서 해석에 있어서 연계층 경계를 설정할 수 있는 기준이 되며, 대륙간 또는 지역간 퇴적층 대비에 있어 건층으로서의 가능성을 가진다 (그림 5, 6). 아울러, 오오도비스 중기 초의 해수면 하강에 의해 북미 대륙 오

오도비스기 탄산염 퇴적층 내에 Knox 부정합 (Kerans, 1993) 및 St. George 부정합 (Knight *et al.*, 1991)과 이에 따른 용식·붕락 각력암층들이 이들 부정합면 직하부에 잘 발달되어 있으며, 한반도와 인접해 있는 북중국의 오오도비스기의 표식지 탄산염 퇴적층에도 동 시대의 부정합 및 용식·붕락 각력암층들이 보고되고 있다 (Fang *et al.*, 1979). 따라서, 막골석회암 상부 층준인 단위층 IV 내에 발달하는 용식·붕락 각력암층들은 오오도비스 중기 탄산염 퇴적층들의 대륙간 또는 지역간 대비에 있어서 매우 중요한 연계층 경계가 된다 (그림 6).

연계층 경계와 함께 퇴적층들의 대비에 있어서 또 하나의 중요한 의미를 가지는 퇴적층은 최대 해침기 동안에 퇴적된 응축층이다 (Loutit *et al.*, 1988). 이러한 응축층은 해침상의 퇴적층과 해퇴상의 퇴적층을 나누는 층서적 기준이 되며 (Loutit *et al.*, 1988), 또한 석유 지질학적 의미에 있어서 다량의 유기 물질들을 포함하고 있어 양질의 근원암으로 평가되고 있다 (Katz and Pratt, 1993). 통합 층서 연구의 일환으로 막골석회암층과 직운산세일층 내에서 수행한 유기 및 무기 지화학 분석은 태백산분지 오오도비스 중기 퇴적층 해석에 있어 새로운 가능성을 제시한다 (그림 7). 유기 지화학 분석 결과 유기탄소의 값은 직운산세일층에서 1-3.4 wt.%의 매우 큰 값을 보이며, 직운산세일층의 최하부 50 cm 층준에서 최대치를 보인 후 점차적으로 감소한다 (그림 7). 따라서 직운산세일층 전체가 양질의 근원암으로 평가될 수 있다. 또한 막골석회암층 내에서 가장 큰 값을 보이는 무기탄소의 값은 직운산세일층 내에서는 급격한 증가와 감소를 반복하는 양상을 보이면서 전체적으로 감소한다 (그림 7). 아울러 X선 회절 분석에 의한 점토광물의 분포 역시 유기 탄소의 값이 최대치를 보이는 직운산세일층의 최하부 50 cm 층준을 기준으로 뚜렷한 변화를 보인다 (그림 7). 이 층준을 기준으로 하부의 해침상의 막골석회암층 내에서는 일라이트만이 나타나, 상부의 직운산세일층으로 갈수록 일라이트의 양은 점차적으로 감소함과 동시에 캐올리나이트와 녹니석 등의 점토 광물들이 나타나기 시작한다 (그림 7).

이러한 분석 결과는 직운산세일층의 최하부 50 cm에 나타나는 다량의 유기 탄소를 포함하는 층준이 최대 해침기에 퇴적된 응축층이라는 해석이 가능하며, 그 상위의 직운산세일층의 대부분은 과거에 일반적으로 알려진 바와는 달리 해침기가 아니라 해퇴기에 퇴적된 퇴적층임을 지시한다. 또한 직운산세일층 내에서의 무기 탄소 성분의 급격한 증가와 감소의 반복은 이들이 암상으로는 차이가 인지되지 않는 작은 규모의 4차 또는 5차 단위의 순차층으로 구성되어 있음을 알 수 있으며 (그림 7), 이는 조간대나 조상대에서도 마찬가지로 깊은 조하대 환경에서도 해수면의 변동으로 인한 주기적인 육성 기원의 퇴적물의 유입과 이로 인한 깊은 조하대 퇴적층 내에서의 유희성을 지시하는 결과로 해석될 수 있다.

이와 같은 사실을 모두 종합하면 태백산 분지 오오도비스 중기 퇴적층 내에서 하나의 독립적인 연계층이 정의될 수 있다. 즉 막골석회암 상부층준 내에 고기 카르스트의 발달과 연계되어 나타나는 불연속면 (부정합?)은 해수면이 최대로 하강하였을 때 형성되는 연계층의 하부 경계이며 이를 덮는 해침상의 막골석회암층 (단위층 V)과 직운산세일층 최하부에 나타나는 응축층이 해침기

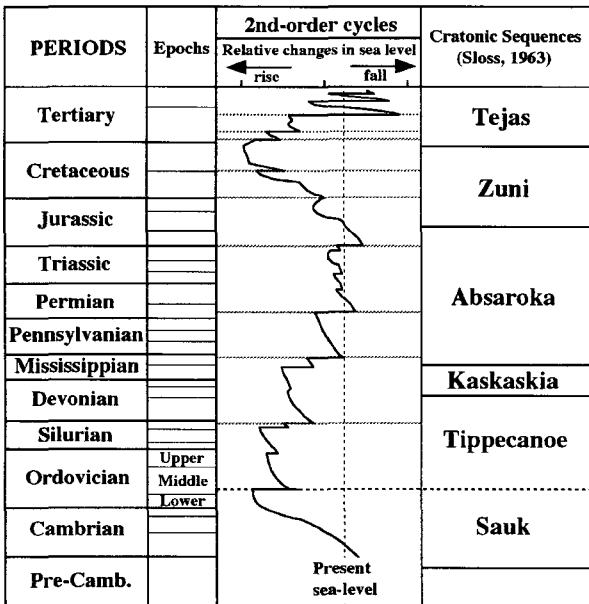


Fig. 6. Temporal correlation of the global sea level change with the subaerial exposure event inferred in the upper Maggol Limestone. The exposure event coincides with the second-order relative sea level drop during the early Middle Ordovician. The second-order global sea level curve from Vail *et al.* (1977).

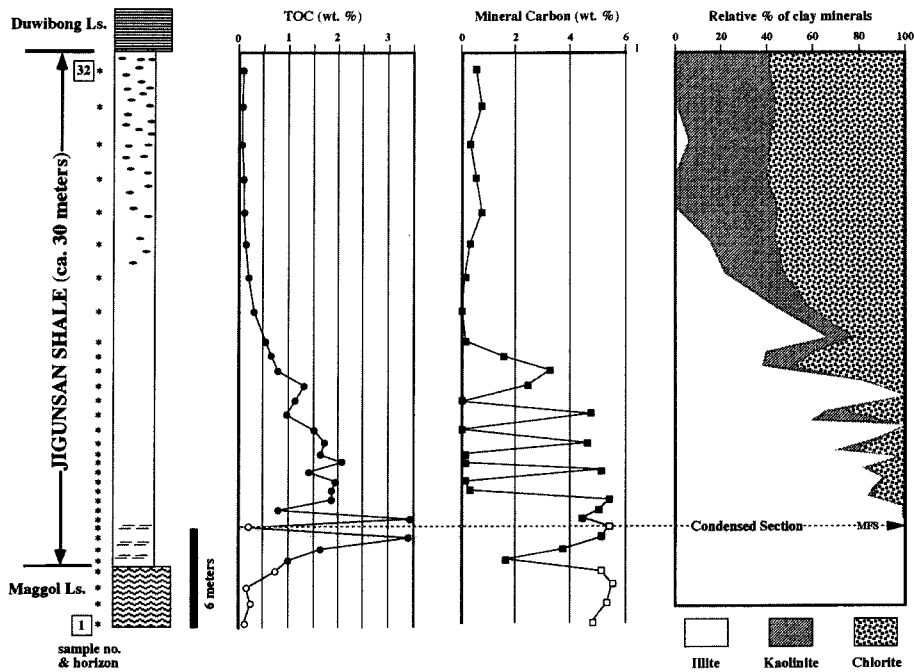


Fig. 7. Vertical variations of total organic carbon, mineral carbon contents, and clay minerals of the Jigunsan Shale in the study area.

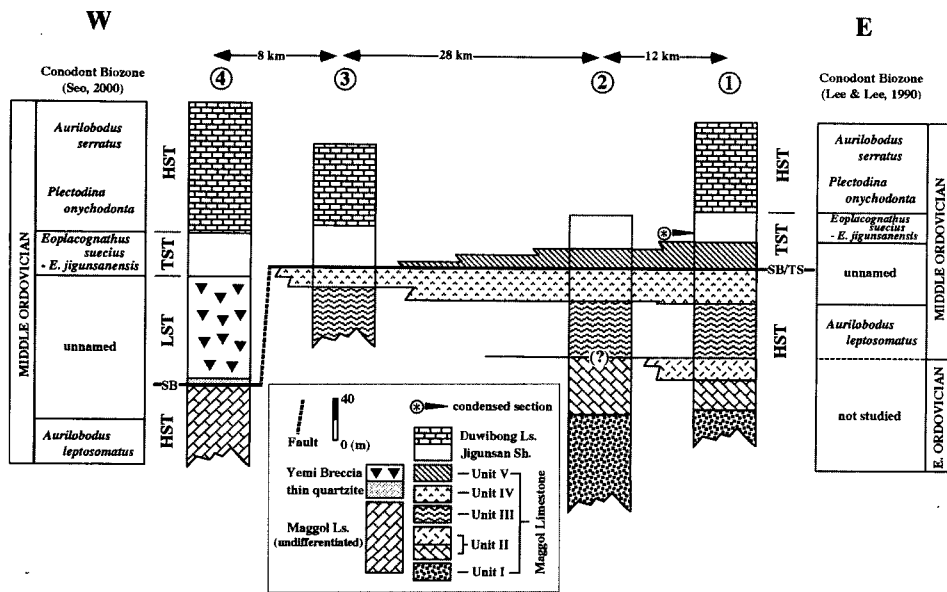


Fig. 8. Schematic sketch illustrating the sequence stratigraphic correlation of the Taebaksan Basin during the Middle Ordovician.

퇴적계에 해당된다. 따라서 응축층 상위의 직운산세일층과 이를 정합으로 덮는 두위봉석회암층은 해퇴기 퇴적계 (또는 고 수위기 퇴적계)이며 두위봉석회암층과 평안누층군 사이의 부정합은 오오도비스 중기 연계층의 상부 연계층 경계에 해당된다.

태백산 분지 오오도비스 중기의 퇴적사

두위봉형 오오도비스 중기 퇴적층에서 설정된 하나의 독립적인 연계층은 인접 예미 및 정선 등지에 분포하는 정선형 오오도비스

중기 탄산염 퇴적층들을 비교 연구하는데 있어서도 매우 중요한 층서적 기준이 된다. 그 동안 이들 지역에 분포하는 정선형 오오도비스 중기 퇴적층들은 암층서적 기준에 의해, 또는 생층서적 기준에 의해 두위봉형 오오도비스 중기 퇴적층과 각기 다른 구조적·층서적 상이성을 보이는 것으로 해석되어져 왔다. 그러나 본 연구를 통해 이루어진 두 지역간 층서 대비는 이러한 상이성이 인지되지 않고 있으며 오히려 층서적 연관성이 인정된다.

그림 8은 연계층을 기준으로 하는 두위봉 및 정선형 오오도비스

스 중기 퇴적층의 층서 대비 단면이다. 예미 지역의 고성세일층과 고성석회암층은 두위봉형의 직운산세일층 및 두위봉석회암층에 각기 대비되기 때문에 고성세일층 내의 응축층을 제외하고 해퇴기 퇴적계에 해당된다. 또한 고성세일층 하부에 나타나는 예미 각력암 및 예미각력암 직하부에 나타나는 박층 (5 m 내)의 규암층은 해수면이 낮았을 때 탄산염 사면을 따라 퇴적된 저수위기 퇴적계로 해석되며 천해성 막골석회암층과 규암층과의 경계가 두위봉 지역에서의 하부 연계층 경계면에 대비된다 (그림 8). 특히 박층의 규암층은 정선 지역 일대에 까지 연장되고 있어 정선 지역에 넓게 분포하는 심해성 정선석회암층과 그 직하부의 천해성 막골석회암층을 나누는 기준이 되며 오오도비스 중기 연계층의 하부 경계로 해석된다 (그림 3). 이러한 층서 대비로부터 두 지역 간 암상 및 화석상의 차이는 하나의 분지 내에서 공간적으로 일어나는 퇴적 작용의 다양성으로 해석되어질 수 있다. 따라서, 이들 태백산 분지 고생대 퇴적층들의 층서적 상이성은 재고되어야 할 필요가 있으며, 본 연구의 결과로 제시되는 태백산 분지 오오도비스 중기 퇴적층의 층서들은 향후 한반도 및 인접 지역의 고생대 퇴적층들의 층서 및 구조적 연관성을 비교 연구하는데 있어서 새로운 층서적 규범으로 적용되어야 한다.

국내 대륙붕 북부 남황해 분지 백악기 퇴적층의 예

층서 개요 및 문제점

국내 대륙붕 1, 2광구에 걸쳐 발달하는 북부 남황해 분지는 중국 동부의 장수 분지를 포함하는 남부 남황해 분지와 중앙 융기대에 의해 분리되어 있으며, 북쪽으로는 산둥 융기대 및 임진강 습곡대와 접하고 있다 (그림 9). 북부 남황해 분지는 군산 분지로 불리기도 하며, 분지 내에 발달하는 소규모 융기대에 의해 북부 소분지, 서부 소분지, 동부 소분지, 중앙 소분지 및 남서 소분지로 구분된다 (그림 9). 북부 남황해 분지의 중국측 연장부도 역시 분지 내의 소규모 융기대에 의해 북부 소분지와 남부 소분지로 구분된다 (그림 9). 1968년 ECAFE의 지원 하에 황해 지역의 탐사가 시행된 이후, 한국측에서 5개공, 중국측에서 17개공의 시추 탐사가 있었으나, 현재까지 경제성 있는 규모의 유전 발견에 성공하지 못하고 있으며, 중국측 북부 소분지의 2개 시추공에서만 유정이 보고되고 있다. 지금까지 북부 남황해 분지 내에서 석유 자원 탐사에 성공을 못하고 있는 이유로는 절대적인 물리 탐사량 부족과 함께 그 동안의 탐사 활동이 광역적 지체구조운동 발달을 근간으로 하는 분지 해석에 바탕을 둔 것이 아니라 제한된 지역

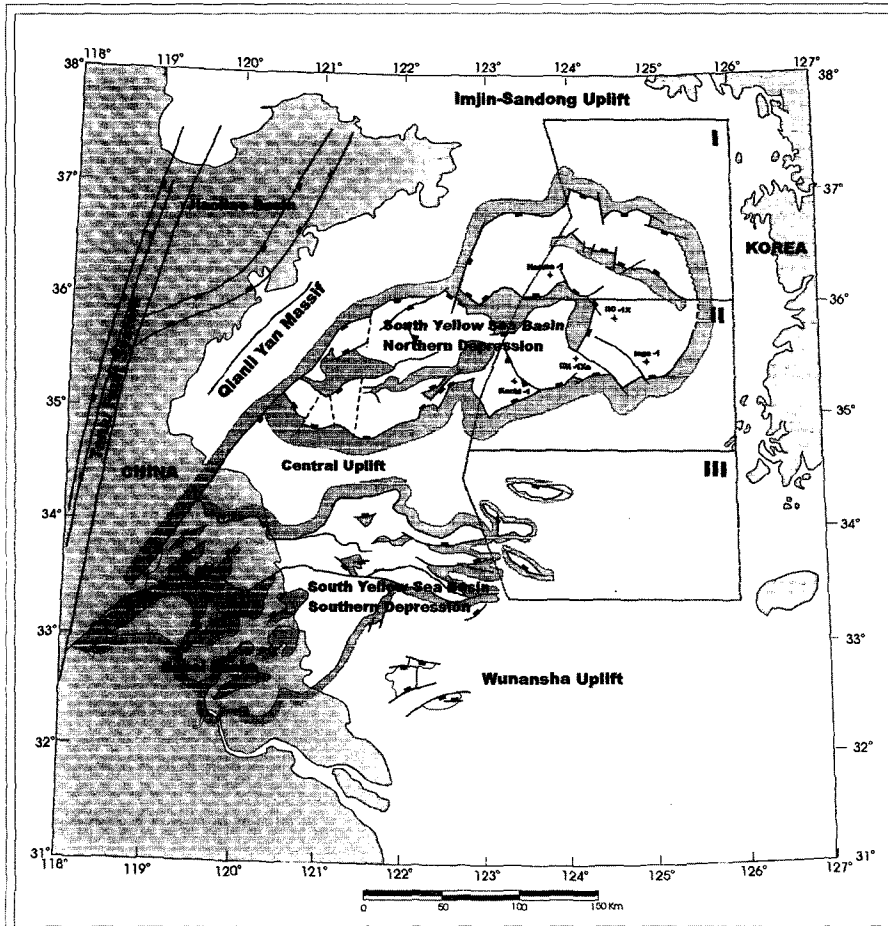


Fig. 9. Simplified structural map of the South Yellow Sea Basin.

의 물리탐사 자료의 구조 해석에만 의존하였기 때문이며, 분지의 층서를 충분히 이해하지 못한 상황에서 도출된 구조트랩의 시추 탐사에 그치고 있기 때문이다. 그러나, 남황해 분지의 육상 연장 부인 중국측 장수 분지에는 1974년 유전 발견에 성공한 이후, 지속적인 탐사활동을 추진하여, 현재 약 700여 개의 탐사정이 시추되었고 31개의 중·소규모의 유전이 추가로 발견되어 생산 중에 있다. 특히, 최근에 들어와 장수 분지 동부 지역에서도 새로운 가스전들이 추가로 발견됨에 따라 황해 대륙붕으로의 연장부인 남부 남황해 분지 및 북부 남황해 분지에 대해서도 석유자원 부존 가능성에 대한 새로운 평가가 요구되고 있다.

북부 남황해 분지 내에는 약 2,000 m 이상의 백악기 퇴적층이 분포한다 (그림 10). 본 분지 내의 백악기 퇴적층은 트라이아스기 탄산염암을 부정합으로 덮으며, 마이오세 중기 퇴적층에 의해 부정합으로 피복된다 (그림 10). 박관순 외 (1997)는 북부 남황해 분지의 백악기 퇴적층을 상부와 하부가 부정합에 의해 경계되는 하나의 megasequence로 정의하였으며, 탄성파의 특성을 고려하여 하부로부터 백악기 초기 또는 쥬라기 단위층, 백악기 초기 단위층, 백악기 중기 단위층 및 백악기 후기 단위층 등 4개의 단위층으로 세분하였다 (그림 10). 그러나, 이러한 탄성파 특성만을 고려한 단위층의 세분은 암상과 화석의 산출상을 전혀 고려하지 않고 있기 때문에 인접한 퇴적 분지들과의 상호 비교를 통해 얻어질 수 있는 시·공간상의 환경 변화 및 대비 등 퇴적층들의 입체적 해석에 문제점을 포함한다.

본 장에서는 국내 대륙붕 1, 2광구에 걸쳐 발달하는 북부 남황

해 분지 백악기 퇴적층에 대한 통합 층서적 접근을 위해 본 분지 내의 기존 5개 시추공 중 백악기 퇴적층의 층후가 2,000 m에 달하는 까치-1공의 암편 시료들을 물로 세척한 후 실체 현미경을 사용 이들의 암상, 입자의 크기 및 색깔 등에 대한 변화를 관찰하였으며, 이를 기준으로 백악기 퇴적층에 대한 층서 분대를 실시하였다. 또한, 본 연구와 병행하여 까치-1공의 암편 시료들로부터 추출된 화분·포자 및 개형충, 윤조류들의 미화석 분석 결과 (윤혜수 외, 2000)를 병합하여 층서 분대시 인지된 단위층들에 대한 시간 층서적 의미를 부여하였으며, 각 단위층들에 대한 물리검층 자료들의 변화 양상을 바탕으로 각 단위층들에 대한 퇴적환경 해석을 실시하였다.

까치-1공의 암층서, 생층서 및 시층서

북부 남황해 분지 까치-1공의 암편 시료들을 분석한 결과, 까치-1공의 퇴적층은 상부로부터 마이오세 중기 단위층 (503-614 m), 백악기 후기 단위층 (614-1,335 m), 백악기 초기 단위층 (1,335-2,280 m), 쥬라기 말-백악기 초기 단위층 (2,280-2,693 m) 및 트라이아스기 단위층 (2,693-2,726 m) 등 5개의 퇴적층으로 분대된다 (그림 10).

마이오세 중기 단위층은 미고결 상태의 사암으로 구성되어 있으며, 박층의 갈탄층 및 연회색 이암이 협재한다. 하부의 백악기 후기 단위층을 부정합으로 피복하며, 상부로 갈수록 천해성 환경으로 전이된다. 본 구간에서는 전반적으로 화분포자 화석이 드물게 산출되나, 이들 중에서 초본 화분화석 *Graminidites media*,

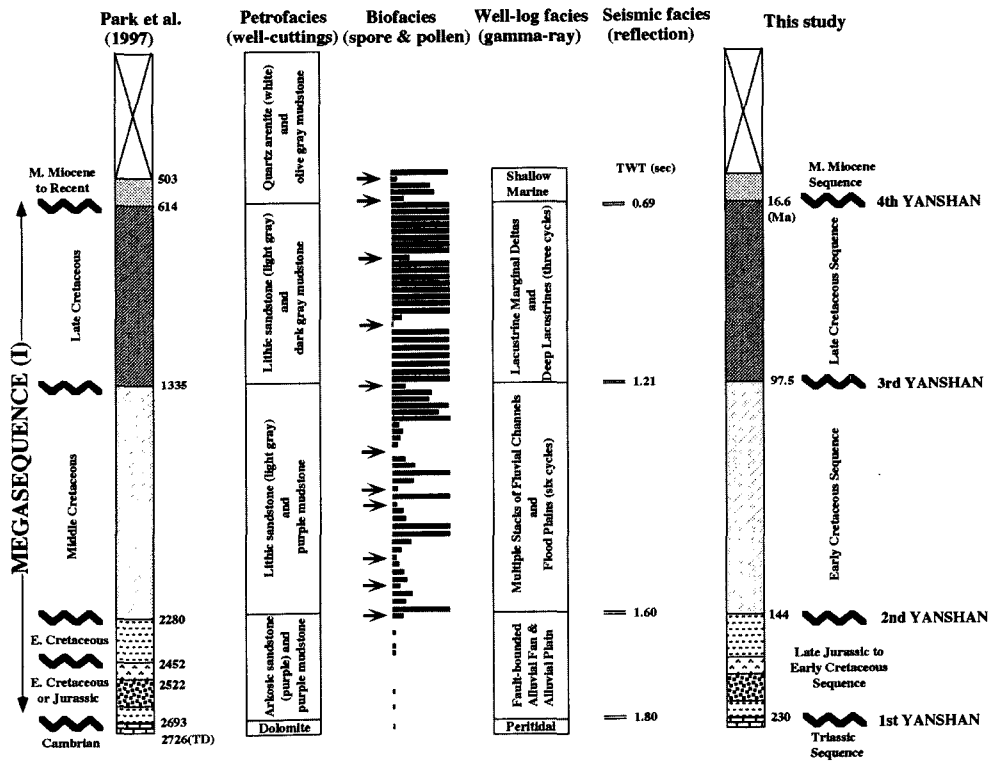


Fig. 10. An example of integrated stratigraphic interpretation, Kachi-1 well, South Yellow Sea Basin.

Fupingopollenites minutus, *Persicarioipollis minor*, *Potamogetonacipites* sp., *Sporotrapoidites erdtmanii*와 목본 화분 화석 *Inaperturopollenites* spp., *Pinuspollenites* spp., *Alnipollenites verse*, *Liquidambarpollenites minutus*, *Quercoidites microhenrici*, *Pterocaryapollenites stellatus*와 포자 화석 *Magnastrites granulastriatus*가 꾸준히 산출한다 (윤혜수 외, 2000). 시대 지시종으로는 마이오세 중기까지만 산출되는 *F. minutus*, *M. granulastriatus*, *S. erdtmanii*가 최상부 구간에서 산출한다 (윤혜수 외, 2000). 또한 본 단위층 내에 아시아 지역에서 마이오세 중기에 풍부하게 산출되는 *G. media*가 포함된다 (윤혜수 외, 2000).

마이오세 중기 단위층에 의해 부정합으로 피복되는 백악기 후기 단위층은 흑색 셰일 및 이암으로 구성되어 있으며, 간간히 탄산염암 및 사암들이 협재한다. 주로 호소성 환경 하에서 퇴적된 것으로 해석되며, 호수 연변부에 발달하는 삼각주성 사암체들이 전진과 후퇴를 반복하는 퇴적 양상을 보인다. 특히, 최하부 약 20 m 구간에 발달하는 두꺼운 역질 사암층은 분지의 확장 및 침강과 관련된 구조 동시성 퇴적층으로 판단된다. 본 단위층의 화분 포자 화석 군집들은 높은 종 다양도와 풍성도를 보이며, *Triporoletes cenomanianus*, *Triporoletes asper*, *Rugubivesculites rugosus*, *Penetetrapites inconspicuus*, *Aquilapollenites eurypteronus*, *Dilwynites granulatus* 등과 같은 백악기 후기의 시대 지시종들이 포함된다 (윤혜수 외, 2000). 이외에 백악기 후기 및 팔레오세 초기의 시대 지시종인 *Azolla cretacea*, *Aquilapollenites spinulosus*, *Alnipollenites trina* 등이 산출한다 (윤혜수 외, 2000). 윤조화석도 주로 백악기 지시속인 *Feistiella*, *Mesochara*, *Porochara* 등이 산출되며, 개형층 화석 역시 백악기 지시종인 *Cypridea* (*C. cavernosa*, *C. (C.) gigantea*, *Metacypris* spp. 등이 산출한다 (윤혜수 외, 2000).

백악기 후기 단위층에 의해 부정합으로 피복되는 1,335-2,280 m 구간의 백악기 초기 퇴적층은 대부분이 적갈색 이암과 사암이 교호되며, 상부로 갈수록 박층의 탄산염암들이 협재되어 나타난다. 주로 범람원 및 하성 환경하에서 퇴적된 것으로 해석되며, 구간내에서 6개의 퇴적회차가 인지된다. 본 구간에서는 주로 포자 화석 *Camptosporites* sp., *Densosporites* spp.이 산출하며, 나자 식물 화분 화석인 *Classopollis classoides*, *Ephedripites* spp., *Inaperturopollenites* spp., *Pinuspollenites* spp. 등 백악기 초기에 가장 번성하였던 종들이 산출된다 (윤혜수 외, 2000). 윤조화석은 상부구간에 비해 산출량은 적으나, 주로 백악기 지시속인 *Feistiella*, *Mesochara*, *Porochara* 등이 산출한다. 특히, 백악기 초기 (Aptian-Albian)의 지시종인 *Porochara mundula*가 산출한다 (윤혜수 외, 2000).

백악기 초기 단위층 하부의 2,280-2,693 m 구간에 나타나는 단위층은 백악기 초기 단위층들과는 달리 장석질 사암 및 응회암으로 구성되어 있으며, 약 30 m 두께의 현무암질 화산암을 포함한다. 본 단위층에서는 전체적으로 화석산출이 빈약하기 때문에 지질시대를 정확하게 규명하기는 어려우나, 백악기 초기의 나자 식물 화분인 *Pinuspollenites*, *Inaperturopollenites*와 담수조류인 *Pediastrum*이 산발적으로 산출된다 (윤혜수 외, 2000). 아울러, 본 단위층에 의해 부정합으로 피복되는 적하부 탄산염암층 (2,693-2,726

m)에서 트라이아스기 지시종인 *Chordasporis* sp., *Ricciisporites* sp., *Aratisporites* sp., 등이 산출하는 점 (박관순 외, 1997)을 근거로, 본 단위층의 지질시대는 백악기 초기에서 트라이아스기 말기에 해당된다고 볼 수 있다. 그러나, 인접 한반도 및 중국 동부의 퇴적 분지 (예; 장수, 자성, 신의주 및 경상 분지)들의 층서와 비교하면 본 단위층은 쥐라기 말기-백악기 초기의 퇴적층에 대비되는 것으로 볼 수 있으며, 단위층의 암상이 분급이 불량한 장석질 사암 및 응회암들로 구성되어 있는 점으로 미루어 쥐라기 말기에 분지의 열개가 시작되면서 급속히 퇴적된 구조 동시성 퇴적층으로 판단된다.

최하부 2,693-2,726 (TD) m 구간의 트라이아스기 단위층은 주로 탄산염암으로 구성되어 있다. 본 단위층 내에서 *Chordasporis* sp., *Ricciisporites* sp., *Aratisporites* sp., 등과 같은 트라이아스기 화석들이 산출되는 점 (박관순 외, 1997)과 인접 중국측 남부 남황해 분지 시추공 (Wuxi-5-ST1공) 및 장수 분지 육상 지역에 노출되어 있는 동 시대 퇴적층과의 암상 대비를 통해 트라이아스기 중기의 퇴적층으로 판단된다. 상부의 쥐라기 말-백악기 초기 단위층에 의해 부정합으로 피복된다.

백악기 퇴적 분지 발달사 및 지체 구조운동

북부 남황해 분지까지-1공의 백악기 퇴적층들은 대부분 육성 환경 하에서 퇴적되었으며, 4개의 광역적 부정합에 의해 상·하부가 경계되어지는 3개의 단위층으로 분대된다 (그림 10). 따라서, 각 단위층들은 광역구조운동과 밀접한 관계를 가지는 2차 순위의 연계층으로 정의될 수 있으며, 각 단위층의 경계면들은 4차례에 걸쳐 일어난 Yanshanian 조산운동의 각 cycle들에 대비된다 (그림 10). 북부 남황해 분지까지-1공에서 인지된 백악기 단위층들을 한반도 전역에 발달하는 여타 백악기 퇴적 분지들에 분포하는 퇴적층들과 비교해 보면 쥐라기 말 이후 백악기에 걸쳐 일어났던 동아시아 지역의 지체 구조운동 및 이에 따른 퇴적 분지 발달사 연구에 있어 매우 중요한 의미를 도출해 낼 수 있다.

한반도 전역에 발달하는 백악기 퇴적 분지들의 지리적 분포 및 그 발달 양태를 보면 4가지 유형으로, ① 영남 육괴 내에 대규모로 발달하는 경상 분지, ② 경기 육괴 내의 공주 단층계에 연계되거나 또는 옥천대와 영남 육괴의 경계부인 광주 단층계에 연계되어 북동-남서 방향으로 뚜렷한 연장성을 보이며 발달하는 분지, ③ 낭림 육괴 내에 청도-압록 단층계와 하부 양자강 단층계에 연계되어 북동-남서 방향으로 뚜렷한 연장성을 보이며 발달하는 분지 및 ④ 하부 양자강 단층계 및 공주 단층계 사이에 남-북 (또는 북북서 및 북북동) 방향으로 발달하는 분지들로 구분될 수 있다 (그림 11).

영남 육괴 내에 대규모로 발달하는 경상 분지는 쥐라기 말의 묘곡층과 함께 백악기 전 기간을 통해 퇴적된 신동, 하양 및 유천준층들이 분포하고 있어 한반도 백악기 퇴적층의 표식지로 알려져 있다 (그림 11, 12). 그러나, 각 퇴적층들의 분포에 있어 분지 내 퇴적작용에 대한 공간상 변화가 인정됨에 따라 이를 기준으로 북쪽으로부터 영남 소분지, 의성 소분지 및 밀양 소분지로 세분된다. 아울러, 경상 분지의 발달 양태를 보면 북북서 및 북북동 두 방향으로의 분지 경계단층들이 인지되는데 이는 곧 경상

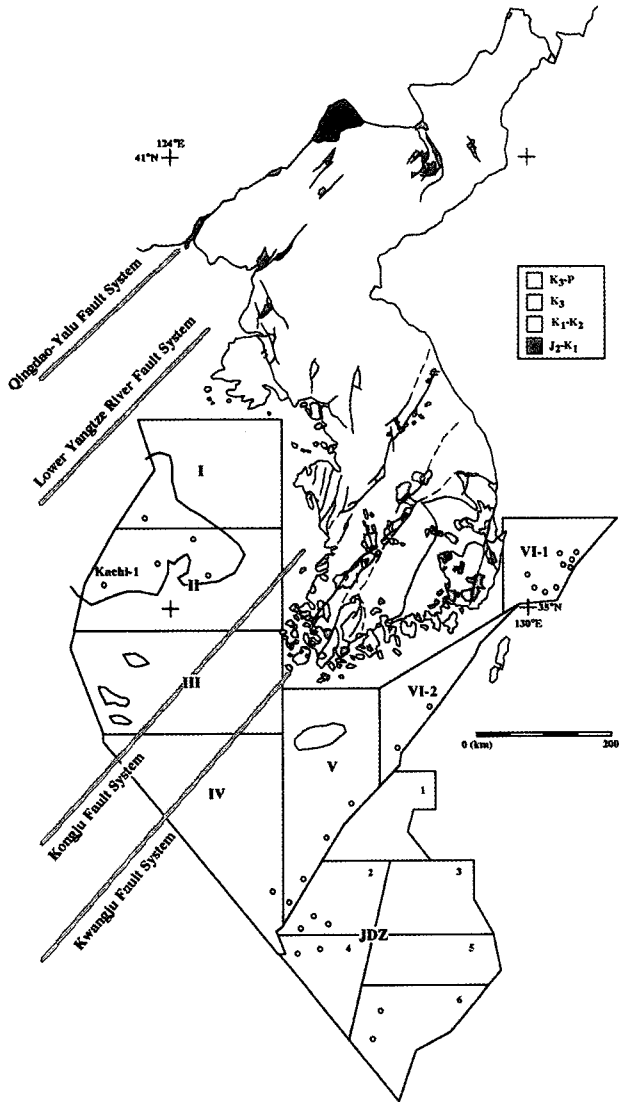


Fig. 11. Location of the Cretaceous basins in the Korean Peninsula.

분지의 형성과 퇴적에 관련된 구조운동의 추론을 가능케 한다. 경상 분지는 대체적으로 이자나기판의 섭입 방향이 변환됨에 따라 형성된 대규모 인리형 분지로, 분지 발달 초기인 유라기 말에 북동-남서 방향으로 발달되어 있는 섭입대 밑으로 이자나기판이 북서쪽으로 이동하면서 직각 섭입함에 따라 최초의 열개형 분지가 발달되어 유라기 말의 묘곡층이 퇴적되었던 것으로 해석된다. 이후, 백악기 초기로 들어오면서 이자나기판의 이동 방향이 서서히 북쪽으로 바뀌게 되고 북동-남서 방향으로 발달되어 있는 섭입대 밑으로 사각 섭입함에 따라 북동-남서 방향의 공주 및 광주 단층계가 형성되고 광주 단층계와 섭입대 사이에 좌수향의 couple shear가 발생되어 북북서 방향의 Ridel shear와 북북동 방향의 conjugate Riedel shear에 의해 분지의 경계들이 확정됨과 동시에 동서 방향으로의 신장력이 작용하여 본격적으로 발달하기 시작한 인리형 분지에 하성 및 호성 환경의 신동층군과 하양층군이 퇴적된 것으로 해석된다 (그림 13). 이후 백악기 말에 들어와 이

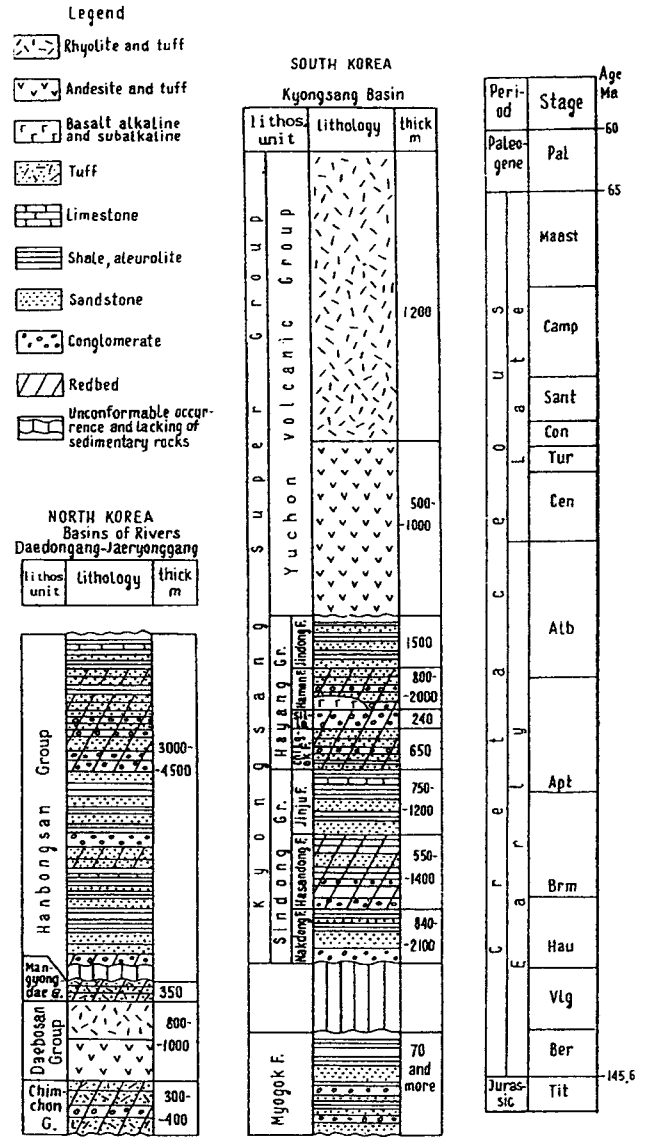


Fig. 12. Simplified stratigraphic columnar section representative of the Cretaceous basins in northern and southern parts of the Korean peninsula. After Chang *et al.* (1999).

자나기판의 섭입속도가 빠르게 진행되면서 화산활동이 절정에 이르게 되어 유천층군이 퇴적되었으며, 제3기 초에 이르러 이자나기판의 이동 방향이 북에서 북서 방향으로 재전환 되면서 한반도 동남부의 전 지역은 북서-남동 방향으로의 압축성 구조운동을 받게 되었을 것으로 해석된다 (그림 13). 그러나, 이러한 압축성 구조운동 환경 하에서도 섭입대 가까이에 위치한 경상 분지는 섭입대 가까이에에서만 일어날 수 있는 부분적인 신장성 구조운동의 영향으로 후퇴성 정단층작용을 받아 북서-남동 방향으로 확장되었던 것으로 해석된다 (Choi, 1986).

한편, 경기 육괴 내의 공주 단층계와 영남 육괴와 옥천대의 경계부의 광주 단층계를 따라 북동-남서 방향으로의 뚜렷한 연장성을 보이며 발달하는 분지 (예; 풍암, 음성, 공주, 부여, 격포, 영

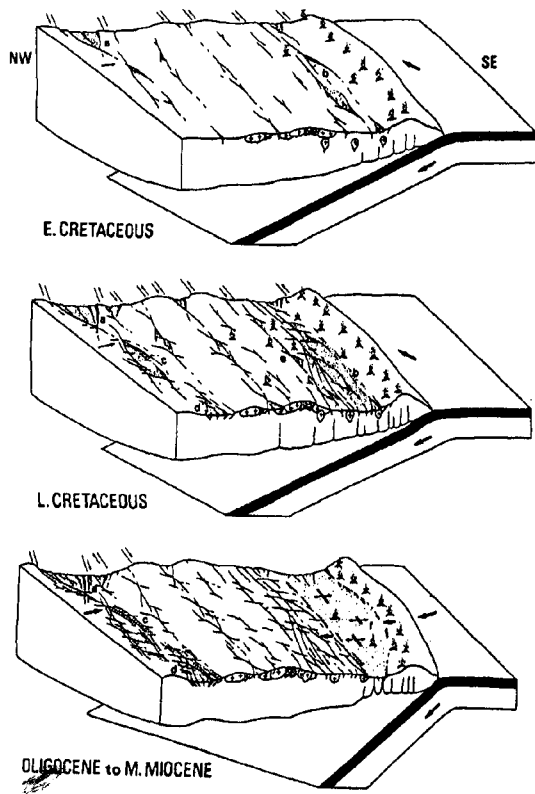


Fig. 13. Basin-forming tectonic model of Cretaceous basins in the Korean peninsula and adjacent areas. After Chun and Chough (1992).

동, 무주, 진안, 내장산, 능주, 및 해남 분지)들도 좌수향의 주향 이동단층에 의해 형성된 인리형 분지로 분류되며, 분지 내 퇴적층들이 대부분 백악기 초기 및 백악기 말기의 단위층들로 구성되어 있는 특징을 보인다 (그림 11). 본 퇴적 분지들은 백악기 초에 이자나기판이 북쪽으로 이동하면서 북동-남서 방향으로 발달되어 있는 섭입대 밑으로 사각 섭입함에 따라 북동-남서 방향의 공주 및 광주 단층계가 형성되고 두 단층계가 좌수향으로의 이동을 시작하면서 여러 조의 소규모 좌수향 인리형 분지들이 발달되었던 것으로 해석된다 (Chun & Chough 1992; 그림 13). 이후, 제3기 초에 들어와 이자나기판의 이동 방향이 북에서 북서 방향으로 재전환되면서 소규모의 인리형 분지들은 압축성 구조운동을 받게 됨에 따라 소멸되었을 것으로 판단된다 (그림 13).

탄루 단층계로부터 분지된 좌수향의 청도-압록 (Qingdao-Yalu) 단층계 및 하부 양자강 (Lower Yangtze River) 단층계에 의해 규제되어 북동-남서 방향으로 발달하는 분지들은 해산-호천강, 자성-중강, 초산, 신의주, 강계, 중암 및 안주 지역에 발달하는 퇴적 분지들을 포함하며, 유라기 말-백악기 초기의 단위층 (예; 자성계)으로만 구성되어 있거나 일부 백악기 초기의 단위층이 이를 부정합으로 피복한다 (그림 11, 12). 유라기 말-백악기 초기의 단위층은 횡적으로 측방 변화가 심하고 각 분지마다 약간씩 다른 퇴적층서를 보이기 때문에 일반화 시키기는 어려우나, 대체적으로 하부의 쇄설성 퇴적암층, 중부의 화산암층, 상부의 쇄설성 및 화산 쇄설성 퇴적암층으로 세분된다 (그림 12). 자성-중강 및 신의주

분지의 신의주통, 초산 분지의 연무리통, 강계 및 중암 분지의 영성통, 안주 분지의 소화리통이 유라기 말-백악기 초기의 단위층에 속한다. 한편, 이를 부정합으로 덮는 백악기 초기의 퇴적층은 유라기 말-백악기 초기의 단위층으로부터 재동된 쇄설성 퇴적암들로 구성되어 있으며, 자성-중강, 초산, 강계 및 중암 분지의 봉천봉통, 신의주 분지의 수진통, 안주 분지의 군우리통이 이에 속한다. 따라서, 이러한 낭림 육괴 내의 분지들은 청도-압록 단층계 및 하부 양자강 단층계들이 탄루 단층계로부터 분지된 후 좌수향으로 이동하면서 유라기 말-백악기 초기 동안에 북동-남서 방향으로 발달하기 시작한 소규모의 인리형 분지들로 해석된다. 이후, 인리형 분지들은 지속적인 동서 방향으로의 신장력에 의해 침강되면서 일부 백악기 초기의 단위층들이 퇴적되었던 것으로 해석된다.

전술한 바와 같이 한반도 백악기 퇴적 분지들의 대부분은 좌수향의 북동-남서 단층계 들을 따라 발달되는 인리형 분지들로 해석된다. 그러나, 하부 양자강 단층계와 공주 단층계 사이에는 전술한 대부분의 백악기 퇴적 분지들과는 발달 방향이 상이한 분지들이 분포한다 (그림 11). 북북동-남남서 및 북북서-남남동의 두 방향성을 보이는 대동강-재령강 분지, 예성강 분지, 연천 분지, 김포 분지, 시화호 분지 및 천수만 분지들이 이에 속하며, 유라기 말-백악기 초기의 단위층을 일부 포함하나, 대체적으로 백악기 초기의 단위층으로 구성되어 있다 (그림 12). 유라기 말-백악기 초기의 단위층 역시 횡적으로 측방 변화가 심하고 각 분지마다 약간씩 다른 층서를 보이기 때문에 일반화 시키기는 어려우나, 대체적으로 하부의 쇄설성 퇴적암층, 중부의 화산암층, 상부의 쇄설성 및 화산 쇄설성 퇴적암층으로 세분된다 (그림 12). 대동강-재령강 분지의 침천층군, 대보산층군 및 만경대층군과 예성강 분지의 평화리통이 유라기 말-백악기 초기의 단위층에 속한다 (그림 12). 한편, 이를 부정합으로 덮는 백악기 초기의 퇴적층은 유라기 말-백악기 초기의 단위층으로부터 재동된 쇄설성 퇴적암들로 구성되어 있으며, 대동강-재령강 분지의 한보산층군과 예성강 분지의 산성리통 및 봉화산통이 이에 속한다 (그림 12). 한편, 남한에 분포하는 연천 분지, 김포 분지, 시화호 분지 및 천수만 분지들은 대부분 백악기 초기와 백악기 말기의 퇴적층을 포함한다 (그림 11). 이러한 경기 육괴 내의 분지들도 역시 청도-압록 단층계 및 하부 양자강 단층계 들이 탄루 단층계로부터 분지 된 후 유라기 말-백악기 초기에 좌수향으로 이동되고 곧 이어 백악기 초기에 들어와 공주 및 광주 단층계가 좌수향으로 이동을 시작하면서 두 단층계 사이에 좌수향의 couple shear가 발생되어 북북서 방향의 Riedel shear와 북북동 방향의 conjugate Riedel shear에 의해 발달하기 시작한 인리형 분지들로 해석된다. 아울러, 청도-압록 단층계 및 하부 양자강 단층계에 근접한 퇴적 분지들은 유라기 말부터, 공주 및 광주 단층계에 근접한 퇴적 분지 들은 백악기 초부터 분지가 형성되었기 때문에 약간의 시간적 차이를 두고 퇴적이 진행되었던 것으로 해석된다. 이후 이자나기판의 섭입이 북서 방향으로 전환되는 백악기 말과 제3기 초에 들어와 두 단층계의 활동이 중단됨에 따라 본 퇴적 분지들은 소멸된 것으로 판단된다. 이상과 같은 한반도 백악기 퇴적 분지들의 발달은 이들의 공간적 분포에 따른 지체 구조운동의 차이에 의해 약간씩 상이한 점들

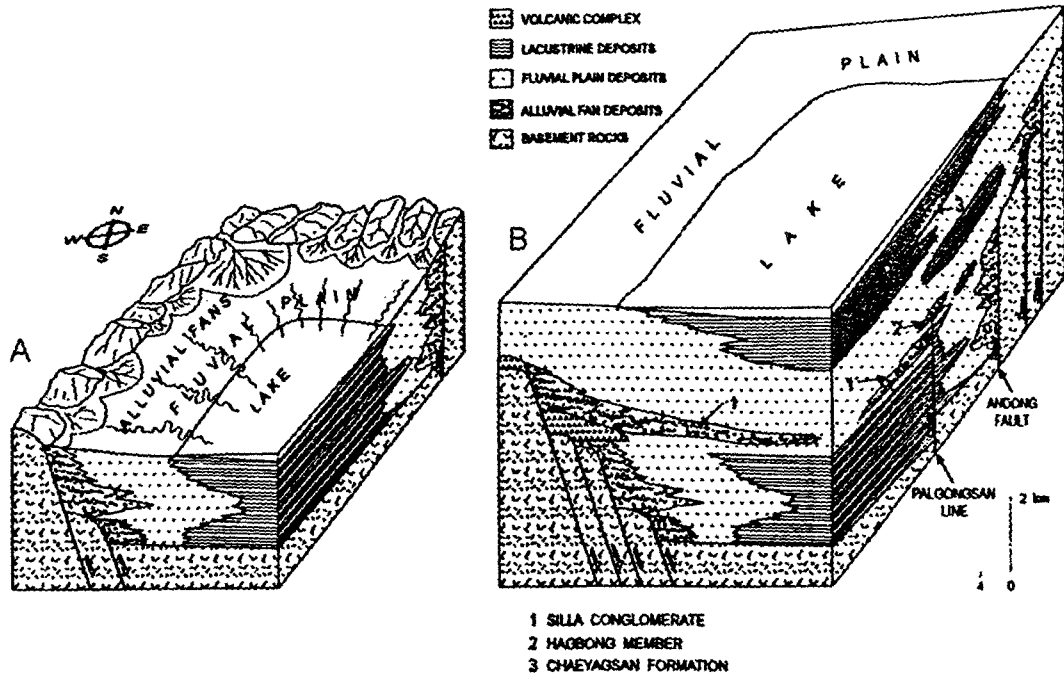


Fig. 14. Reconstruction of depositional framework of the Kyongsang Basin. A) At the end of the Sindong period. B) At the end of the Hayang period. After Choi (1986).

을 보인다. 그러나, 대체적으로 트라이아스기 말에 들어와 남중국 지괴가 북중국 지괴에 만입 충돌된 이후 좌수향으로 이동되는 탄루 단층계의 영향과 백악기 초에 들어오면서 이자나기판의 섭입 방향이 북서에서 북쪽으로 변환됨에 따라 발생하는 좌수향의 couple shear에 의해 대륙 지각의 압축과 신장 (crustal shorting and extension)의 결과로 형성된 대륙 내의 인리형 퇴적 분지들로 해석된다 (그림 13). 이러한 인리형 퇴적 분지들은 대륙 지각 위에 형성되기 때문에 공히 육성 환경의 퇴적체들에 의해 채워지며, 화산암체들의 분출과 관입을 동반한다 (그림 12). 대체적으로 주라기 말로부터 백악기 초까지는 지역적으로 소규모의 열개 분지들이 발달하며, 분지의 경계 단층들을 따라 침강된 기반암 위에 층적 선상지가 형성되어 화산암의 분출과 함께 장석질 사암들이 퇴적되었던 것으로 해석된다 (그림 12). 이후 백악기 초기에 들어와 소규모의 열개형 분지들은 본격적인 인리형 분지들로 발달하기 시작하면서 분지 경계부의 층적 선상지는 공간적으로 하류로 갈수록 층적 평야를 지나 분지 중심부의 호수 환경으로 전이되었고 시간적으로도 분지 중심부 호수 환경의 범위가 수축 또는 확장되면서 계속적인 퇴적이 진행되었던 것으로 판단된다 (그림 14). 그러나, 백악기 말에 들어오면서 이자나기판의 섭입이 빠르게 진행되면서 한반도 동남부 지역에 칼크 알카리 계열의 화산암체들의 분출 및 관입이 지역적으로 일어났으며, 화산 분출이 왕성한 지역은 높은 화산 대지를, 상대적으로 낮은 지역은 하성 및 호수 환경 하에서의 퇴적이 진행되었다. 이후 제3기 초에 들어와 이자나기판의 섭입 방향이 북에서 북서로 재차 변환됨에 따라 주라기 말과 백악기에 걸쳐 형성되었던 퇴적 분지들은 북서-남동 방향의 압축성 분지변형 구조운동에 의해 소멸된 것으로 해석된다 (그림 13).

국내 에너지 및 광물자원 탐사를 위한 통합 층서의 필요성

그림 15는 국내 대륙붕 제주 분지 내의 시추공들에 대한 기존 층서 대비 자료들을 비교한 것으로 (권영인 외, 1995) 제주 분지 내 퇴적층 대비에 있어서도 심각한 해석적 오류가 있어 왔음을 잘 보여준다. 이러한 문제는 암층서, 생층서 및 탄성파층서 등 기계적 층서 원리들의 배타성에 기인하며, 지금까지 특정 분지들의 퇴적층 해석을 위해 암층서, 생층서 및 탄성파층서 등의 연구가 필요에 따라 각기 독자적으로 수행되어져 왔기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 이러한 기계적 층서 원리들을 바탕으로 수행되었던 기존의 퇴적층 평가에는 해석적 오류가 내포되어 있으며, 이는 곧 국내 퇴적 분지 내에 분포하는 에너지 및 광물자원의 효율적 탐사를 위한 전략 수립에 있어 하나의 장애가 되고 있다. 따라서, 이에 대한 보완책으로 통합 층서 기술에 대한 적용이 시급한 실정이다.

그림 16에 제시된 것은 통합 층서 기술 개발의 계통도를 보여주는 것으로 국내에서는 지금까지 주로 기계적 의미의 층서 연구가 수행되어져 왔음을 보여준다. 일부, 국내 퇴적 분지 내의 자원 탐사를 위해 순차 층서의 개념이 도입되고는 있으나 전반적인 층서학의 수준은 주요 과학 선진국과 비교해 볼 때 20여년 뒤진 상태에 있으며, 통합 층서의 기술 수준 역시 아직까지 미미한 수준에 머물고 있다. 그러나 통합 층서 발전에 중요한 관건이 되고 있는 시설 기반들은 선진국과 비교해 볼 때 대등한 수준에 있는 것으로 판단된다. 즉, 통합 층서 기술 개발을 위한 시설 기반은 구축되어 있으나, 이를 효율적으로 이용하여 국내·외 에너지 및

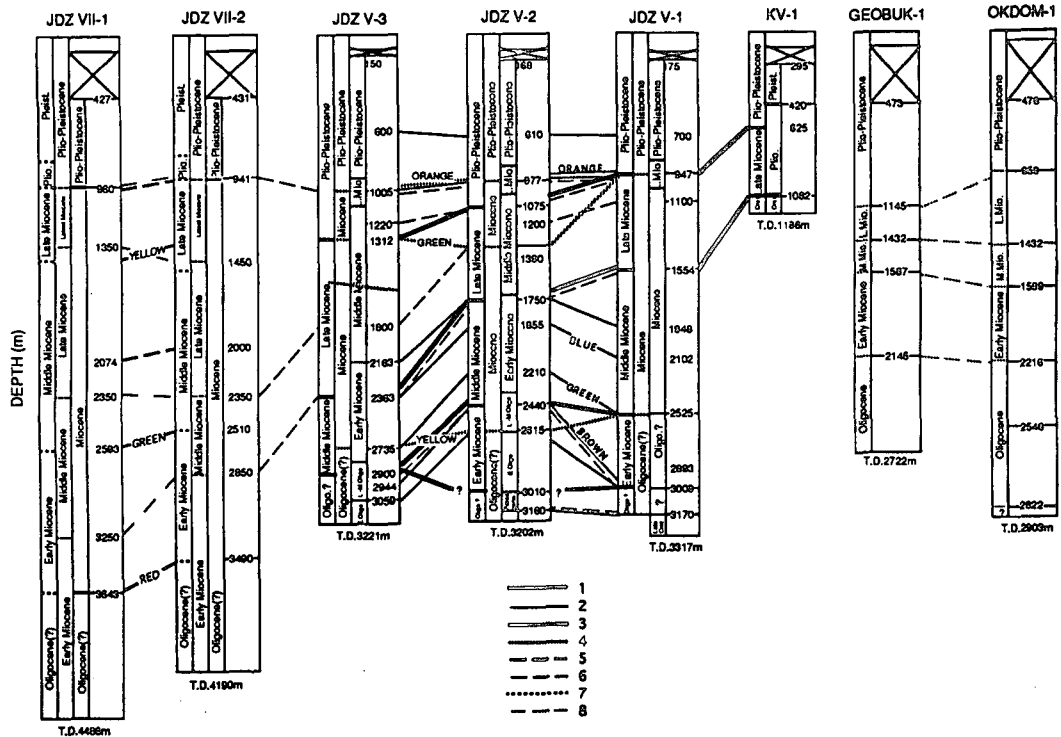


Fig. 15. Correlation diagram of the Tertiary Cheju Basin by lithologic, paleontologic, and seismic data. Note the crosscutting correlation lines between JDZ V-3 and JDZ V-1. After Kwon *et al.* (1995).

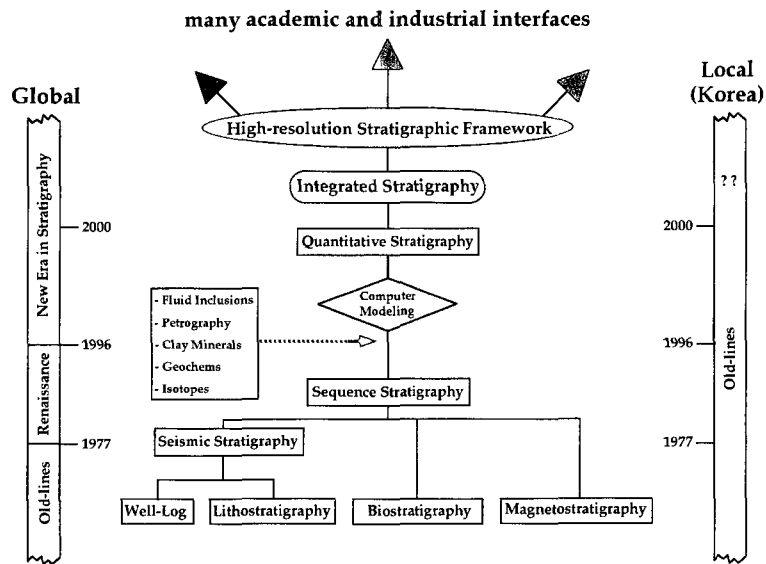


Fig. 16. Diagram showing the developing stage of the integrated stratigraphy technology.

광물자원 탐사사업에서 필요로 하는 연구 개발로 연계시킬 수 있는 개념적 기반이 취약한 상태이다. 따라서, 통합 층서 기술을 국내의 퇴적 분지들에 심도있게 적용함으로써 새로운 개념으로 이들 퇴적 분지들의 자원 부존 가능성을 재평가함과 동시에 국내 자원 관련 산·학·연간의 개념적 기반을 공고히 하여 향후 국내·외 자원 탐사 사업의 성공률을 높이기 위한 기술력을 확보

하여야 할 것이다.

결론 및 제언

에너지 및 광물자원의 탐사사업은 국가경쟁에 있어서 절대적으로 필요한 공공의 기반산업에 해당한다. 그러나 그 동안 수행되

있던 자원 탐사사업 대부분은 천부에 분포하는 단순 구조 트랩들에 집중되어 왔으며, 이들의 기 개발로 인하여 점차 심부에 분포하는 구조 트랩 및 미세 층서 트랩들까지 탐사범위가 확대되고 있다. 이러한 심부의 트랩들을 효과적으로 개발해 내기 위해서는 광역적 퇴적 분지 해석 뿐만 아니라 이를 근간으로 한 분지 내 퇴적층들의 정밀 해석이 요구되고 있는 실정이다. 분지 내 퇴적층들의 정밀 해석은 그 동안 독립적으로 발전되어 왔고 각기 선택적으로만 적용되어 왔던 기존의 기재적 층서 원리들로는 불가능하며, 1990년 이후 대두되기 시작한 순차 층서학이나 이를 바탕으로 최근에 들어와 새롭게 발전되기 시작한 통합 층서 기술의 도입이 선행되어야 만이 가능하다.

통합 층서 기술을 국내 육상 퇴적 분지인 태백산 분지 두위봉형 오오도비스 중기 퇴적층에 실험적으로 적용해 본 결과, 지역 간 대비에 있어서 기존의 기재적 층서 개념에 의한 퇴적 모델에 비하여 보다 실제적인 새로운 모델이 제안되었다. 새로운 퇴적 모델은 현재 태백산 분지 오오도비스 중기 퇴적층에 대한 자원 탐사 및 개발사업의 방향을 설정해 나가는데 있어서 필수적인 층서적 규범으로 쓰여 질 수 있으며, 태백산 분지의 심부에 분포하는 다중 광상 개발사업 등에 활용된다면, 이들 사업의 탐사 성공률을 높이는데 기여할 수 있다. 또한 국내 대륙붕 에너지자원 부존 가능성 평가를 위한 분지 해석 연구에도 (예: 북부 남황해 분지) 통합 층서 기술이 적용되기 시작하였으며 향후 국내 대륙붕 에너지자원 탐사 및 개발사업의 성공률을 높이는데 기여할 것으로 전망된다. 아울러 국내 대륙붕 에너지자원 탐사 및 개발사업 뿐만 아니라 차세대 에너지원으로 주목받고 있는 가스 수화물 (gas hydrate) 및 분지중심 가스전 (basin-centered gas) 등의 개발 사업을 위해 필수적인 기술이라는 점에 있어서 통합 층서 기술의 중요성이 강조되어야 한다.

사 사

본 논문은 2000년 한국석유공사 창립 21주년 기념 석유자원 탐사 및 개발 학술발표회 발표논문집에 수록된 기존의 논문 "국내 육해상 퇴적 분지 해석을 위한 통합 층서 기술의 적용성 연구"를 재 편집한 것임을 밝힌다. 본 논문 중 새롭게 삽입된 북부 남황해 분지의 분석 자료들은 2000년 한국석유공사 기술실과 고려대학교 전략광물자원연구센터간 공동으로 수행한 연구 보고서인 "한반도 지구조운동 발달과 석유 부존 가능성 연구"에서 발췌되었다. 본 자료들을 제공하고 논문 발표를 수락하여 주신 한국석유공사 기술실 제위께 감사드린다. 또한 논문을 심사하시고 세심한 지적과 건설적인 비판을 해주신 임명익의 심사자들에게 감사드리며, 아울러, 직운산세일층의 점토 광물 및 유기물 분석에 도움을 주신 한국지질자원연구원 손병국박사님과 김학주씨에게 감사드린다.

참고문헌

권영인, 박관순, 유강민, 손진담, 1995, 제주분지 제삼기 육성층의 층서 및 퇴적물 기원. 한국석유지질학회지, 3, 1-15.

- 김옥준, 권영식, 1970, 의림길 부근의 지질-특히 예미 각력암층에 대하여. 지질학회지, 6, 213-220.
- 박관순, 박근필, 선우돈, 권영인, 유동근, 정태진, 오재호, 봉필윤, 손진담, 이호영, 유병재, 손병국, 황인걸, 이영주, 김학주, 1997, 군산분지 서부지역의 석유자원 평가 연구. 한국자원연구소 연구보고서 KR-97(C)-17, p.3-190.
- 유인창, 도성재, 최선규, 백광호, 1997a, 삼척 탄전 장성 지역에 분포하는 페름기 장성층의 층서에 대한 재고찰. 지질학회지, 33, 78-86.
- 유인창, 도성재, 최선규, 1997b, 하부 오오도비스기 막골석회암내에 발달한 탄산염 각력암: 성인 및 층서적 중요성. 지질학회지, 33, 234-243.
- 윤해수, 이성숙, 이상현, 이의형, 2000, 남황해 분지 생층서 연구. 한국석유공사 용역보고서.
- 이하영, 이종덕, 1971, 강원도 삼척군 동점부근에 분포된 대석회암통의 코노돈트 화석군과 그의 층서학적 의의. 지질학회지, 7, 89-101.
- 정창희, 이대성, 엄상호, 장기홍, 김항목, 1973, 한국의 지질 계통 확립을 위한 조사 연구. 과학기술처, R-73-51, 68p.
- Armentrout, J. M., 1996, High resolution sequence biostratigraphy: examples from the Gulf of Mexico Plio-Pleistocene, In: Howell, J. A. and Aitken J. F. (eds.), High resolution sequence stratigraphy: innovations and applications. Geological Society of London Special Publication 104, 65-86.
- Chang, K. H., Filatova, N. I. and Park, S. O., 1999, Upper Mesozoic Stratigraphic Synthesis of Korean Peninsula. Economic and Environmental Geology, 32, 353-363.
- Cheong, C. H., 1969, Stratigraphy and paleontology of Samcheog coalfield, Korea (1). Journal of the Geological Society of Korea, 5, 13-56.
- Choi, H. I., 1986, Sedimentation and evolution of the Cretaceous Gyeongsang Basin, southeastern Korea. Journal of Geological Society London, 143, 29-40.
- Chun, S. S. and Chough, S. K., 1992, Tectonic history of Cretaceous sedimentary basins in the southwestern Korean Peninsula and Yellow Sea. In: Chough, S. K. (ed.) Sedimentary Basins in the Korean Peninsula and adjacent seas, Special Publication of the Korean Sedimentology Research Group, p.107-123.
- Ethington, R. L. and Clark, D. L., 1981, Lower and Middle Ordovician conodonts from the Ibex area western Millard County, Utah. Bingham Young University, Geology Studies, 28, 1-60.
- Fang, T. C., Xia, T. L. and Liu, H. L., 1979, Paleontological stratigraphy. Geological Press, Beijing, 308p. (in Chinese).
- Hyeong, K. S., 1990, Depositional environments of the Duwibong Formation (Late Ordovician). Unpublished MS thesis, Seoul National University, Seoul, Korea 140p.
- Katz, B. J. and Pratt, L. M., 1993, Source rocks in a sequence stratigraphic framework. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology 37, 247p.
- Kerans, C., 1993, Description and interpretation of karst-related breccia fabrics, Ellenburger Group, West Texas, In: Fritz, R. D., Wilson, J. L. and Yurewicz, D. A., (eds.), Paleokarst related hydrocarbon reservoirs. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Core Workshop 18, 181-200.
- Knight, I., James, N. P. and Lane, T. E., 1991, The Ordovician St. George Unconformity, northern Appalachians: The relationship of plate convergence at the St. Lawrence Promontory to the Sauk/

- Tippecanoe sequence boundary. *Geological Society of America Bulletin*, 103, 1200-1225.
- Kobayashi, T., 1966, Stratigraphy of the Chosen Group in Korea and South Manchuria and its relation to the Cambro-Ordovician formations of other areas, Section A, The Chosen Group of South Korea. *Journal of Faculty and Science, University of Tokyo*, 16, 1-73.
- Lee, H. Y., 1976, Conodonts from the Maggol and Jeongseon Formation (Ordovician), Kangweon-Do, South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 12, 151-181.
- Lee, K. W. and Lee, H. Y., 1990, Conodont biostratigraphy of the Upper Choseon Supergroup in Jangseong-Dongjeom area, Gangweon-do. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 6, 188-210.
- Lee, Y. I., 1988, Storm sedimentation in the Middle Ordovician Duwibong Formation, southern Taebaeg city. *Journal of the Geological Society of Korea*, 24, 234-242.
- Loutit, T. S., Hardenbol, J., Vail, P. R., and Baum, G. R., 1988, Condensed section: the key to age determination and correlation of continental margin sequence, In: Wilgus, C. W., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., Posamentier, H. W., Ross, C. A. and Van Wagoner, J. C., (eds.), *Sea Level Change: An integrated approach*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 42, 183-213.
- Paik, I. S., 1985, Evaporite mineral casts in the Maggol Formation (Ordovician), Jangseong, Kangweondo. *Journal of the Geological Society of Korea*, 21, 219-226.
- Paik, I. S., 1986, Dolomitization of the Middle Ordovician Maggol Formation in Jangseong Area, Gangweondo, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 22, 333-346.
- Paik, I. S., 1987, Depositional environments of the Middle Ordovician Maggol Formation, southern part of the Baegunsan Syncline area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 23, 360-373.
- Ryu, I. C., 2002, Tectonic and stratigraphic significance of the Middle Ordovician carbonate breccias, Ogcheon Belt, South Korea. *Island Asrc*, 9, (in print).
- Seo, K. S., 2000, Biostratigraphy and conodonts from the Lower Paleozoic sequence in the Singdongeup, Jeongseon area, Kangwondo, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 36, 499-516.
- Sloss, L. L., 1963, Sequences in the cratonic interior of North America. *Geological Society of America Bulletin*, 74, 93-114.
- Vail, P. R., Mitchum, R. M. and Thompson, S., 1977, Global cycles of relative changes of sea level, In: Payton, C. E., (ed.), *Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, p. 83-98.
- Van Wagoner, J. C., Mitchum, R. H., Campion, K. M. and Rahmanian, V. D., 1990, Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: Concepts for high-resolution correlation of time and facies. *American Association of Petroleum Geologists Methods in Exploration Series 7*, 55p.
- Weimer, P. and Posamentier, H. W., 1993, Siliciclastic sequence stratigraphy - recent developments and applications. *American Association of Petroleum Geologists Memoir 58*, 492p.
- Wilgus, C. W., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., Posamentier, H. W., Ross, C. A. and Van Wagoner, J. C., 1988, Sea-level changes: an integrated approach. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publications 42*, 407p.
- Woo, K. S. and Park, B. K., 1989, Depositional environments and diagenesis of the sedimentary rocks, Choseon Supergroup, Korea: past, present, and future; the status of the art. *Journal of the Geological Society of Korea*, 25, 347-363.

(2001년 11월 30일 접수)